

商丘地区高炮增雨效果分析

黄庚 朱立亚 俞香仁

段学信 陈慈雨 李广亮

(中国气象科学院, 北京 100081) (河南商丘地区气象局, 476000)

提 要

用不同统计单元统计分析了河南省民权县 1991—1992 年高炮作业的增雨效果。以日雨量为统计单元, 33 个作业日中 76% (25 天) 显著地增加了雨量, 2 年共增雨 329.1mm。以月、季为统计单元, 作业期间增雨显著的为 48% 以上, 而增雨效果不显著或雨量减少的为 21% 以下。但总的看, 以年雨量为统计单元, 民权县的人工增雨作业年均增雨 14%, 两年共增雨 172.2mm。

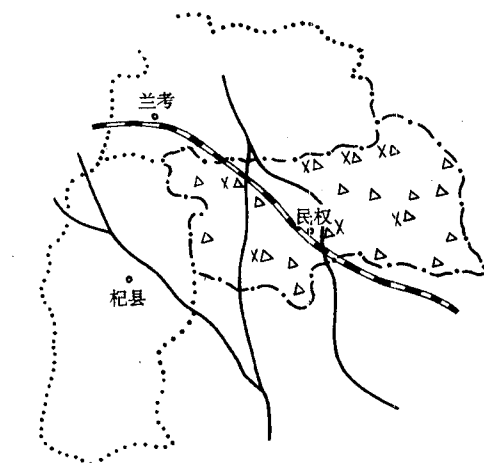
关键词: 人工增雨 效果检验 雨量统计

引 言

国内普遍运用三七高炮进行人工增雨抗旱作业。在地、县范围内以抗旱为目的的作业中找对比云、搞随机作业设计是很困难的, 对这类作业效果评估十分重要。我们充分利用已有的观测资料和历史气象资料, 选择了多种试验统计单元来进行检验, 以期得到统计上比较可信、物理上有一定依据的结果。

1 作业试验区和对比区

河南省商丘地区位于豫东平原东部, 为黄河冲积平原, 面积 10586km², 民权县面积 1222km², 位于该区西北部, 海拔 30—70m。干旱是当地主要自然灾害之一。据 1956—1989 年 34 年气象资料统计, 全区 8 县市年平均雨量 724mm, 年平均蒸发量为 1884mm, 是雨量的 2 倍多; 民权县年平均雨量 675mm, 是全区雨量最少的县。近年来, 由于降水减少, 经济建设用水增多, 造成黄河水夏季不时断流, 地下水水位下降, 机井不断加深也难以满足需求, 在这种背景下当地各级政府拨出专项经费并协调气象、保险及各级职能部门, 开展人工防雹增雨与农作物统筹保险相结合的试验, 试验分头并进。增雨作业始于 1990 年末, 当年作业 5 天 (2 个天气过程), 大多数作业时间在 1991—1992 年。民权设 7 门双管三七高炮, 20 个雨量观测点 (见附图)。2 年中对 21 次天气过程作业 33 天, 用 AgI 炮弹 2650 发, 作业时 711 雷达观测指



附图 民权炮点和雨量点分布

民权: 作业试验区, 杞县: 对比区

叉号: 炮点 圆圈: 雨量点

据当地雷达的观测和 500hPa 高空风的统计, 当地云雨 88% 受偏西、偏北气流的影响, 向东或东南移, 12% 受副高或登陆台风偏南气流的影响, 向偏北移, 为此选择民权西邻杞县作试验对比区, 两县面积相当, 同属平原地区, 两气象站相距 36km, 杞县地处天气过程的上风方, 一般不受作业时催化剂的影响, 所处的天气系统也相似, 从年、季、月 28 年两县站雨量资料统计, 相关系数 r 为 0.7028—0.9332, 两地日雨量 (61—101 个样本) 相关

系数 r 在 0.778—0.937 之间,相关性好。把民权、杞县雨量作为统计变量 y_i, x_i , 进行效果统计分析检验。

2 资料及处理

表 1 为作业试验期雨量,表中“试验区”为所布雨量点作业过程平均雨量,“杞县”“民权”为相应气象站 08—08 时实测日雨量(表中表示同一作业过程,只用一个年号),“预报雨量”是根据台站的预报折合雨量。由表 1 资料统计,作业期民权气象站与所布雨量点的平均雨量相关系数为 0.8895(计算表略),相关性好,说明在平原地区该气象站代表性较好,考虑到雨量点缺少历史资料,因此在作历史回归统计时一律采用气象站资料。表 2 是与作业有关的各月的日雨量回归方程,利用民权与杞县两气象站 1985—1989 和 1962—1966 年的 61 至 101 天雨量统计得出,目的是作日雨量的非参数检验。符号检验表和秩和检验表略。表 3 为月、季度、年增雨效果回归统计汇总表。选择作业次数较多的 5、6、7、8 月和夏、秋两季及年分别作 28 年历史雨量

表 1 作业试验期雨量/mm

时间	杞县 x_{k_i}	民权 y_{k_i}	试验区	台站预报
1991.5.5	12.2	12.6	14.7	0.1—9.9
1991.5.19	18.1	45.0	30.8	0.1—9.9
1991.6.26	0	0	0	0
1991.6.27	0	0.0	(23.0)	0.1—9.9
1991.6.28	0.0	0.0	0	0.1—9.9
1991.7.12	0	0.0	0.0	0
1991.7.17	5.0	2.4	2.4	17.0—37.9
1991.7.19	7.6	37.8	19.1	0
1991.7.26	18.9	53.8	55.0	0.1—9.9
1991.7.27	0.1	52.3	60.7	0.1—9.9
1991.8.16	0.0	0.3	7.6	0.1—9.9
1991.8.24	4.5	9.0	(9.7)	0.1—9.9
1991.8.25	0.7	1.5	5.0	5.0—16.9
1991.9.1	7.5	30.5	(52.9)	5.0—16.9
1991.9.2	1.1	5.6	0	0.1—9.9
1991.11.6	8.2	8.3	(13.5)	0.1—9.9
1991.11.7	2.1	3.2	0	0.1—9.9
1992.2.28	7.0	10.1	(24.0)	0
1992.2.29	2.1	4.9	0	0.1—9.9
1992.5.4	94.9	105.0	(135.1)	0.1—9.9
1992.5.5	15.3	44.3	5.0	5.0—16.9
1992.6.12	0.0	0.5	(31.4)	0.1—9.9
1992.6.13	15.7	15.9	0	0.1—9.9
1992.6.20	0.5	0.5	(14.5)	10.0—24.9
1992.6.21	12.4	9.5	10.0	10.0—24.9
1992.7.9	0.0	3.8	0	0
1992.7.10	0.0	1.8	(47.9)	0.1—9.9
1992.7.11	31.6	95.2	0	0.1—9.9
1992.7.12	0.0	6.4	28.5	17.0—37.9
1992.7.13	2.6	0.4	(41.3)	5.0—16.9
1992.7.14	53.6	42.2	25.0	25.0—49.9
1992.7.15	16.3	32.8	20.5	25.0—49.9
1992.8.4	43.0	29.2	45.7	10.0—24.9
合计	381.0	664.8	678.3	135.7—486.2

注:预报雨量为试验区发布

表 2 日雨量回归方程

2月:	$\hat{y} = -0.203 + 0.856x$	$r = 0.873$
5月:	$\hat{y} = 2.394 + 0.752x$	$r = 0.856$
6月:	$\hat{y} = 0.323 + 0.703x$	$r = 0.809$
7月:	$\hat{y} = 2.800 + 0.861x$	$r = 0.787$
8月:	$\hat{y} = 3.812 + 0.558x$	$r = 0.778$
9月:	$\hat{y} = -0.196 + 0.867x$	$r = 0.892$
11月:	$\hat{y} = 0.896 + 0.825x$	$r = 0.937$

回归统计分析, x 为杞县, y 为民权, $\sum y_{k_i}$ 为各统计单元内作业期日雨量和, $\sum y_{k_i}/$ 统计单元表示该单元内作业雨量所占的比例。各单元回归统计分析表,正态分布检验表及计算过程略,统计结果见表 3。 $\bar{x}_n, \bar{y}_n$ 为 1962—1989 年平均雨量, $\bar{x}_k, \bar{y}_k$ 为作业试验期平均雨量。

3 效果分析

3.1 直接对比分析

由表 3 得, 1962—1989 年, 高炮人工增雨作业前杞县年均雨量 $\bar{x}_n = 689.4\text{mm}$, 民权年均雨量 $\bar{y}_n = 675.2\text{mm}$, 比杞县少 2%、14.2mm, 其中夏季少 0.2%、0.7mm。1991—1992 年人工增雨试验期, 杞县年均雨量 $\bar{x}_k = 604.0\text{mm}$, 民权年均 $\bar{y}_k = 698.7\text{mm}$, 反比杞县多 15.6%、94.7mm, 其中夏季多 31%、93.4mm。由表 1 的日雨量, 作业试验期, 杞县 33 天总雨量为 $\sum_{k_i=1}^{33} x_{k_i} = 381.0\text{mm}$, 民权总

雨量 $\sum_{k_i=1}^{33} y_{k_i} = 664.8\text{mm}$, 比杞县多 $\sum \Delta y = 283.8\text{mm}$ 、多 74%; 如以作业试验区的雨量点的平均雨量作比较, 则比杞县多 78%、297.3mm。如把 $(y_{k_i} - x_{k_i})$ 的正值作为作业成功, 那么有 23 天, 作业成功率达 70%, 差值为负的有 5 天, 不成功的占 15%, 还有 15% 效果不明显。粗略直接比较, 从作业的日雨量到年雨量, 增雨效果都显著, 成功率也相当高。

3.2 与预报对比分析

为使人工增雨效果易于被预报员接受, 每次作业后, 将作业区雨量与预报值比较(见表 1)。为示公允, 作业决策与预报相互独立, 预报员不参与作业决策。

由表 1 得: 作业日预报总雨量为 135.7—486.2mm, 平均 311.0mm, 作业试验区雨量点平均总雨量 $\sum_{k_i=1}^{33} y_k = 678.3\text{mm}$, 比预

报值高 192.1—542.6mm, 比预报上界多 192.1mm, 比预报平均值多 367.3mm。如用民权气象站雨量与预报值比较, 则多 178.6—529.1mm, 比预报值上界多 178.6mm, 比预报平均值多 353.8mm。以逐日作业实测雨量与预报值比较, 高于其上限的 13 天, 占 39%, 14 天在预报范围之内, 占 42%。如把作业日雨量多于预报平均值认为作业成功, 那么成功率为 52%。总的说, 民权高炮增雨作业与预报比较分析, 有 52% 作业增加了雨量, 作业日总雨量比预报上限多 37%、178.6mm。

3.3 日雨量的非参数统计检验

为检验高炮作业以日雨量为单元的增雨效果, 我们选用 1962—1989 年与作业月份一致的日雨量作为统计样本, 建立日雨量预报回归方程如表 2。把对比区杞县作业试验期的日雨量作为自变量 x , 算出民权试验区的雨量期望值 $\hat{y}$, 由于日雨量不呈正态分布, 我们采用符号与符号秩和检验来检验作业日雨量的增雨效果。

3.3.1 符号检验 根据作业试验期民权的日雨量 y_{k_i} 与期望值 $\hat{y}$ 及两者的差值 $(y_{k_i} - \hat{y})$, 算出差值的正负次数 n_+ 和 n_- 。如此例, $n_+ = 24, n_- = 5, n_0 = 4, \therefore N = n_+ + n_- = 29$, $r(n_+, n_-)_{\min} = 5$ 。由 $N = 29$ 查符号检验表得: $r_{\alpha} = 7$ 时, $\alpha = 0.01$, 现 $r = s < r_{\alpha}$, 显著度 α 超过 0.01, 可以认为在 0.01 显著性水平下民权作业试验增加了雨量。按日雨量回归统计, 2 年

作业共增雨 $\sum_{i=1}^{33} \Delta y_{k_i} = \sum y_{k_i} - \sum \hat{y} = 329.1\text{mm}$ 。

3.3.2 符号秩和检验

在符号检验的基础上, 把 $(y_{k_i} - \hat{y})$ 按绝对值的大小进行编组排列, 编以序号, 正值列于 A 组, 负值列于 B 组, 作符号秩和检验表(略)。按检验规则, 容量小的秩和为 $T = 64.5, A = 24, B = 5$, 故样本总量 $N = A + B = 29$ 。在我们所用的符号秩次统计表中 N 只列至 20, 对于 $N = 19, T = 64.5$ 时, $\alpha = 0.1165$; 对于 $N = 20, T = 64.5$ 时, 显著度 $\alpha = 0.0685, N$ 增加 1, α 减少 0.048, 依此变率, 对于 $N = 29, T = 64.5$ 时, 显著度 α 应远小于 0.05。因此, 以 5% 的显著度可以认为民权作业增加了日雨量。

3.4 雨量的区域回归统计检验

为检验民权高炮作业试验的增雨效果和 33 天的增雨作业对月、季、年雨量有多大影响, 我们选择了年及作业次数较多的月、季分别进行了回归统计分析和检验。

如表 3, 我们选择了年、夏、秋和 5、6、7、8 月七个统计单元。依区域回归检验规则, 把民权作为目标区, 杞县作为对比区, 把两区各单元雨量作为一对统计变量且进行变量的分布检验, 由表 3, 它们的分布拟合度在 0.7081—0.9664 之间, 服从正态分布(检验表略), 满足各统计单元增雨效果的 t 检验要求。

表 3 增雨效果区域回归分析汇总表

统计单元	年雨量/mm	雨量/mm					
		5—17 月	8—10 月	5 月	6 月	7 月	8 月
杞县 $\bar{x}_n$	689.4	300.0	265.6	63.3	70.3	168.6	139.8
杞县 $\bar{x}_k$	604.0	300.4	171.1	146.1	72.5	81.9	114.7
民权 $\bar{y}_n$	675.2	299.3	251.4	60.6	67.0	174.4	136.0
民权 $\bar{y}_k$	698.7	393.8	177.8	160.0	68.2	165.7	108.9
统计样本 n (年)	28	28	28	28	28	28	28
试验样本 k (年)	2	2	2	2	2	2	2
作业次数(天)	33	23	6	4	7	12	4
区域相关系数 r	0.8259	0.7028	0.7497	0.9332	0.9322	0.7738	0.7883
区域回归方程	$\hat{y} = 169.5251$	$\hat{y} = 108.2355$	$\hat{y} = 84.7111$	$\hat{y} = -1.7378$	$\hat{y} = 17.8642$	$\hat{y} = 56.4474$	$\hat{y} = 32.1146$
	$+0.7355x$	$+0.6275x$	$+0.6275x$	$+0.9848x$	$+0.6992x$	$+0.6996x$	$+0.7431x$
分布拟合度 x_i	0.9640	0.9228	0.7442	0.7383	0.8955	0.9013	0.7764
	y_i	0.8997	0.9230	0.8368	0.7081	0.8986	0.9664
试验 $\bar{y}_k - \hat{y}$ (mm)	86.1	94.2	-13.7	17.9	-0.4	51.9	-8.5
效果 $\frac{\bar{y}_k - \hat{y}}{\bar{y}}$ (%)	14	31	-7	13	-1	45	-7
$\sum y_{k_i}$ /统计单元(%)	48	71	21	65	19	99	18
效果 t 值	4.3919	4.7597	-1.5397	4.4703	-0.1352	4.2006	-1.5632
检验 显著度 α	<0.001	<0.001	>0.1	<0.001	>0.5	<0.001	≈0.1

对各单元 28 年(1962—1989 年)雨量求相关系数 r , $r=0.7028-0.9332$ 之间,显著度皆超过 0.001,建立了历史回归方程。如年雨量, $r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = 0.8259$, 回归方程: $\hat{y} = 169.5251 + 0.7335x$, 则其增雨量 $\Delta y = y_k - \hat{y}_k$:

$$1991 \text{ 年: } \Delta y_{91} = y_{p1} - \hat{y}_{p1} = 576.7 - 532.9 = 43.8$$

$$1992 \text{ 年: } \Delta y_{92} = y_{p2} - \hat{y}_{p2} = 820.6 - 692.2 = 128.4$$

$\therefore \sum \Delta y = \Delta y_{p1} + \Delta y_{p2} = 172.2 \text{ mm}$,
 $\sum \Delta y / \sum \hat{y}_k = 172.2 / 1225.1 = 14\%$, 即民权县高炮人工增雨 2 年, 相对增加雨量 14%, 绝对增雨 172.2 mm。

增雨量的显著性 t 检验: 由表 3, 对于年增雨量, $t=4.3919$, 由自由度 $\nu=n-2=26$ 查 t 检验表得: $t_{0.001}=3.707$, $t > t_{0.001}$, 显著度 α 超过 0.001, 即民权高炮增雨作业年均增雨 86.1 mm 的显著度超过 0.001。对于其它统计单元, 最明显的是 7 月, 增加 45%, 年均增雨 51.9 mm, 显著度 $\alpha < 0.001$, 5 月份增雨 13%、年均 17.9 mm, $\alpha < 0.001$, 显著, 6 月减少 1%、年均 0.4 mm, $\alpha > 0.5$, 不显著; 夏季这 3 个月雨量增加了 31%、年均增加 94.2 mm, $t=4.7597$, $\alpha < 0.001$, 显著。8 月雨量减少 7%、8.5 mm, $t=-1.5632$, $\alpha \approx 0.1$, 不显著, 9 月仅作业 2 天, 10 月没作业; 秋季这 3 个月雨量减少 7%、13.7 mm, $t=-1.5397$, $\alpha >$

0.1, 不显著。

1991—1992 年, 民权总雨量 1397.3 mm, 其中作业日雨量 664.8 mm, 占总雨量的 48%, 近一半; 5 月份作业日雨量占该月总雨量的 65%, 6 月占 19%, 7 月占 99%, 8 月占 18%; 夏季占 71%, 秋季占 21% (见表 3), 显示了作业效果与总雨量的相应关系, 作业雨量占相应统计单元雨量 48% 以上的作业单元, 增雨效果都比较显著, 而占 21% 以下的都不显著, 7 月份、夏季作业最多, 增雨也最显著。

4 小 结

在河南省民权县 1991—1992 年高炮作业期间, 由于当地抗旱的需求, 对主要的降水系统基本上都作了催化作业, 特别是在 7 月, 作业降水占全部降水的 99%, 夏季(5—7 月)占 71%, 全年占 48%, 我们采用以月、季、年为单元进行了统计检验, 都得出显著的增雨效果, 而作业雨量所占比例不大的其它月、季则变化多为不显著, 增雨显著的年、季、月的增雨统计量相互也是吻合的。我们还采用日雨量为单元作区域历史回归的非参数统计检验, 虽有些天作业不显著, 但总的增雨也是显著的。

参考文献

- 1 叶家栋, 范蓓芬. 人工影响天气的统计数学方法. 北京: 科学出版社, 1982 年.
- 2 中国科学院数学研究所. 常用数理统计方法. 北京: 科学出版社, 1974 年.

Effect of Precipitation Enhancement Operation in Minquan County

Huang Geng et al.

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Abstract

Precipitation enhancement experiment was carried out in Minquan County, Henan Province in two years (1991—1992). The antiaircraft guns firing 37mm AgI shells were used to seed the clouds. The seeded rainfall amount consisted of 48 per cent for a year, 71 per cent for summer and 99 per cent for July. The historical rainfall data of the experimental and contral area in 28 years were used to analyse the seeding effect. It was shown that rainfall was increased by seeding for 14 per cent (172.2mm) for a year, 31 per cent (188.4mm) for summer and 45 per cent (103.8mm) for July.

Key Words: precipitation enhancement operation effect test rainfall statistic